

文章编号 1004-924X(2026)02-0179-12

## 星载紫外临边探测仪切点几何定位与切高订正

王嘉琛<sup>1,2,3\*</sup>, 商建<sup>1,2,3\*</sup>, 杨磊<sup>1,2,3</sup>, 王静<sup>4</sup>, 刘崧<sup>1,2,3</sup>, 李清扬<sup>1,2,3</sup>,  
李元<sup>1,2,3</sup>, 林冠宇<sup>5</sup>, 李占峰<sup>5</sup>, 徐娜<sup>1,2,3</sup>, 江若楠<sup>6</sup>

(1. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

2. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

3. 中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

4. 北京遥测技术研究所, 北京 100076;

5. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

6. 北京华云星地通科技有限公司, 北京 100081)

**摘要:**准确评估和订正临边大气探测仪器的在轨指向及观测切点高度偏差对全球痕量气体的垂直反演精度至关重要。针对我国风云三号F星全新仪器-紫外临边探测仪(Ozone Monitoring Suite-Limb, OMS-L), 基于仪器精测坐标系推导了扫描镜观测几何指向模型, 构建了等距离虚拟椭圆切高解算模型, 首次研发了8种配置参数模式分析计算地球椭圆/圆球模型、卫星轨道姿态、仪器安装参数以及叠加因素对理论设计观测切高的影响。针对采用knee点法评估出的OMS-L在轨测试期间存在的切高系统偏差, 在轨订正仪器安装俯仰参数并统计12个月的仪器指向稳定性。结果表明切高订正精度优于0.4 km, 仪器垂向(沿轨)指向季节性变化小于0.01°。针对OMS-L跨轨指向精度, 采用同平台同波段的对地观测仪器图像作为基准进行图像匹配, 结果表明OMS-L跨轨方向定位偏差对应仪器指向偏差为0.1°。OMS-L沿轨跨轨在轨指向精度满足临边探测痕量气体反演需求。

**关键词:**大气临边探测; 紫外; 风云三号F星; 观测几何; 指向精度; 图像匹配

**中图分类号:** TP722.3 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20263402.0179

**CSTR:** 32169.14.OPE.20263402.0179

## Geolocation of the tangent point and tangent height correction for spaceborne ultraviolet limb sounder

WANG Jiachen<sup>1,2,3\*</sup>, SHANG Jian<sup>1,2,3\*</sup>, YANG Lei<sup>1,2,3</sup>, WANG Jing<sup>4</sup>, LIU Song<sup>1,2,3</sup>, LI Qingyang<sup>1,2,3</sup>,  
LI Yuan<sup>1,2,3</sup>, LIN Guanyu<sup>5</sup>, LI Zhanfeng<sup>5</sup>, XU Na<sup>1,2,3</sup>, JIANG Ruonan<sup>6</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center (National Centre for Space Weather),  
Beijing 100081, China;

2. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA,  
Beijing 100081, China;

4. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

收稿日期: 2025-09-29; 修订日期: 2025-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U2242212)

5. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;

6. Beijing Huayun ShineTek Science and Technology Limited Company, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangjiachen@cma.gov.cn

**Abstract:** Accurate assessment and correction of on-orbit pointing errors and tangent height deviations of limb sounders are essential for achieving high vertical accuracy in global trace retrievals. For the newly launched Ozone Monitoring Suite - Limb (OMS-L) onboard Fengyun-3F, the geometric pointing model of the scanning mirror was established based on the precisely measured instrument coordinate system. The tangent height calculation model was constructed using an equidistant virtual ellipsoid. Eight configuration parameter modes were designed to analyze the influence of the earth model, orbital and attitude information, installation parameters, and their combined effects on the theoretically designed tangent heights. During on-orbit testing, the systematic tangent height deviation was identified by knee-point method. To correct this deviation, the pitch installation parameters were adjusted, and the pointing stability of the instrument was statistically analyzed over a period of 12 months. The results show that the tangent height correction accuracy is better than 0.4 km, and the annual inter-annual variation of the instrument vertical (along-track) pointing is less than  $0.01^\circ$ . For cross-track pointing accuracy, image matching was performed using reference images acquired from the same platform and spectral band of the earth observation instrument. The results show that the cross-track pointing deviation of OMS-L reach  $0.1^\circ$ . The on-orbit pointing accuracy of OMS-L met the requirements for trace gas inversion and retrieval.

**Key words:** atmospheric tangent detection; ultraviolet; FengYun-3F; observation geometry; pointing accuracy; image matching

## 1 引言

风云三号 F 星 (FY-3F) 紫外高光谱臭氧探测仪-临边 (OMS-L) 是我国风云气象卫星搭载的大气臭氧等痕量气体探测仪器, 它通过临边观测的方式探测平流层大气对太阳紫外和可见光的散射, 反演得到全球痕量气体的垂直分布廓线以及云、气溶胶定量产品。由于地球大气中绝大部分要素的分布呈现垂直非均一性, 对于临边探测而言, 准确的高度信息是保证廓线反演精度的重要前提<sup>[1]</sup>。临边探测仪器视线与地球表面距离最近的点被定义为切点 (Tangent Point, TP), 而该点高于地球大地水平面的高度则被称为切线高度, 简称切高 (Tangent Height, TH)<sup>[2]</sup>。Loughman R P 指出当观测切高解算存在 0.5 km 偏差时, 臭氧廓线反演误差高达 10%~55%<sup>[3]</sup>。刘崧分析了切高误差对廓线反演的影响, 指出 2km 的切高偏差可导致气溶胶消光系数反演结果最大出现 2 倍以上的误差<sup>[4]</sup>。由于大气临边探测类型的观测切点距离星下点较远, 当观测视轴指向出现微小角

度偏差时, 经过距离放大会导致切高出现较大误差<sup>[5]</sup>, 从而会导致痕量气体反演误差。FY-3F OMS-L 作为风云卫星上搭载的首个紫外波段临边探测仪器, 其通过  $0.045^\circ$  的瞬时扫描视场和  $\pm 0.01^\circ$  的扫描镜指向精度实现了大气垂直空间分辨率 3 km 和临边高度 15~60 km 的切高观测<sup>[6]</sup>。由于 FY-3F 卫星轨道高度约为 836 km, OMS-L 仪器到最远的观测切点距离超过 2 700 km, 上述扫描镜指向精度最大会造成临边高度约  $\pm 0.9$  km 的误差。因此精确的切高几何计算模型和 OMS-L 在轨光轴指向稳定性对臭氧垂直分布产品反演精度至关重要。

目前国内外很多学者对临边仪器光轴指向、切点定位和切高检验等方面进行了深入的研究。吴伟平对临边观测仪器视轴临边指向精度的在轨补偿进行了详细论证与实验, 其采用观测恒星补偿卫星平台姿态误差和仪器在轨热变形对临边指向精度的影响, 使臭氧探测仪的临边指向精度达到  $\pm 7.9''$  以上<sup>[7]</sup>; 刘志文对天宫二号紫外前向光谱仪大气临边高度确定的几何模型进行了

研究,其采用等扁率的方式逐层构造地球虚拟椭圆,减小了切点投影位置偏差<sup>[8]</sup>,但是改变了大气层析高度的等间距特性。王晓恒提出了一种以不同分辨率实现天底与全方位临边同时探测的新方法,这种同时探测的方法还可以依靠对地观测图像来订正临边指向偏差<sup>[9]</sup>。在切高检验方面,较为常见的是基于紫外临边辐射特性的切高检验方法。Moy采用65 km高度附近295 nm波长观测辐亮度与模拟辐亮度的残差作为切高偏移标记,同时引入355 nm波长以减少辐射计算的不确定性,该方法需要较高的观测切高,可有效规避平流层气溶胶的干扰<sup>[10]</sup>。针对国外的SCIAMACHY, C. von Savigny分析了SCIAMACHY三年期间指向误差和空间变化规律,发现切线高度存在振幅为220 m的季节性变化<sup>[1]</sup>。Gottwald M和Kaiser J W通过Knee点法对SCIAMACHY在轨切高偏差和稳定性进行了分析,发现在轨初期存在3 km的切高偏差和±200 m的中误差<sup>[11-12]</sup>。在切高校正方面,朱芳提出一种基于UV窄波段的切线高度反演THRUNB方法用于校正SCIAMACHY临边辐射切线高度,实验结果表明THRUNB方法比TRUE方法进行切高校正的平均精度提高了45%,而算法的运行时间减少了20%<sup>[13]</sup>。

考虑到极轨气象卫星的星上资源, FY-3F OMS-L仪器设计时不具备观测太阳和恒星的能力,且切高范围只限于15~60 km,因此上述指向订正方法对OMS-L并不完全适用。对于由于安装等引起的系统性切高偏差,本文基于Knee点法,通过统计OMS-L观测辐亮度Knee点与辐射传输模型模拟值Knee点间的高度差实现OMS-L仪器垂直指向的系统性修正。对于二维综合指向误差,考虑充分利用仪器扫描镜下限的对地观测能力和共平台同通道载荷紫外高光谱臭氧探测仪-天底(Ozone Monitoring Suite-Nadir, OMS-N)的较高分辨率成像能力,通过0 km理论对地观测图像与OMS-N对地观测图像匹配进行指向精度评估。

本文首先推导OMS-L的理论定位切高算法模型,设计8种配置参数分析了卫星轨道姿态、椭圆模型、安装矩阵等几何因素对切高的影响。然后在卫星发射后对在轨测试初期的切高系统偏差

采用knee法进行检验与订正,最后通过与OMS-N图像匹配进一步检验仪器二维指向精度。

## 2 临边观测几何与切点定位模型

FY-3F OMS-L是一种紫外/可见波段临边大气探测仪器,它通过设计扫描镜以0.026°的步进间隔依次转动,在836 km的轨道高度上将15~60 km垂向空间分辨率为3 km的大气散射光反射到望远镜中来实现临边探测<sup>[14]</sup>。基于上述仪器设计参数可以得出切高与扫描角的对应关系为0.009°/km,与仪器绝对指向角度的对应关系为0.017°/km。如图1所示,当将地球视为简化圆球模型时,扫描镜法线与卫星-X轴夹角 $\theta$ 与探测临边高度 $h$ 的关系如公式(1)所示:

$$\begin{cases} \theta = \arccos\left(\frac{h+R}{H+R}\right)/2 \\ h = \cos 2\theta \times (H+R) - R \end{cases} \quad (1)$$

上述指标关系是基于地球简化圆球计算得到的,但是仪器实际在轨观测的目标是地球椭圆。此外卫星实际轨道、实际姿态和安装偏差等均会对实际观测切点位置和高度产生影响。因此,要想精确得到切点位置需要首先求解任一扫描角度下的仪器出射视向量,然后建立虚拟椭圆模型求解视向量与虚拟椭圆的交点坐标。

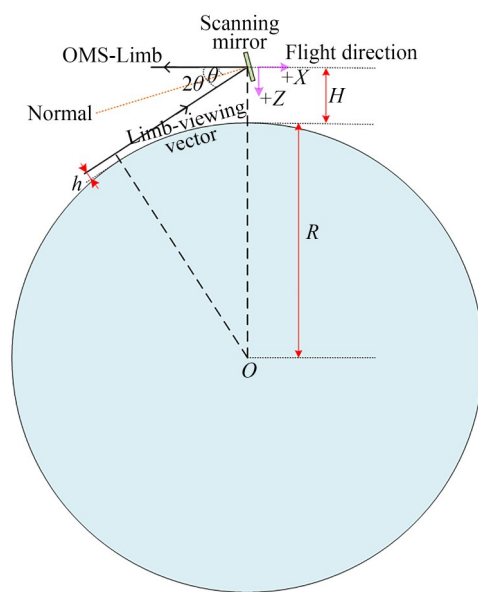


图1 理想圆球切点高度示意图

Fig. 1 Tangent height of the ideal sphere

## 2.1 仪器扫描视向量计算

为了高精度获得望远镜成像类仪器的光轴指向,陈宝刚分析了影响望远镜指向精度的各种因素,包括三轴误差、编码器测角精度、镜筒光轴弯沉以及大气折射等影响,建立了指向误差修正模型<sup>[15]</sup>。基于相关研究经验,OMS-L定义了4种仪器内部坐标系在实验室精测各个机械结构间的静态和动态精密几何关系,通过坐标系的转换关系可以实时计算扫描镜实际指向。这4种精测坐标系如图2所示,包括机械坐标系 $S_{\text{mac}}$ 、棱镜基准坐标系 $S_{\text{cube}}$ 、主箱体光轴坐标系 $S_{\text{optics}}$ 和扫描镜坐标系 $O_{\text{scan}}$ ,它们之间的关系如表1所示。设在

光轴坐标系下出射光线矢量为 $\boldsymbol{v}=[1 \ 0 \ 0]^T$ ,光轴坐标系到棱镜坐标系的坐标旋转矩阵为 $T_{\text{optics2cube}}$ ,因此在棱镜基准坐标系下主光轴矢量表示为 $\boldsymbol{u}_{\text{out,cube}}=T_{\text{optics2cube}}\boldsymbol{v}$ 。设在棱镜基准坐标系下扫描镜法线相对于 $Y$ 轴和 $Z$ 轴分别旋转了 $\theta_y$ 和 $\theta_z$ ,则扫描镜坐标系到棱镜坐标系的坐标旋转矩阵为 $T_{\text{scan2cube}}=R_z(\theta_z)R_y(\theta_y)$ 。扫描镜法线矢量在扫描镜坐标系下为 $[-1 \ 0 \ 0]^T$ ,则转换为棱镜坐标系下表示为:

$$\boldsymbol{n}_{\text{cube}}=T_{\text{scan2cube}}\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

表1 OMS-L精测坐标系之间的联系

Tab. 1 OMS-L precision measurement coordinate system

|          | 主箱体光轴坐标系 | 扫描镜坐标系                | 棱镜基准坐标系          | 机械坐标系                       |
|----------|----------|-----------------------|------------------|-----------------------------|
| 主箱体光轴坐标系 | /        | 建立了出射光轴与扫描镜反射光路间的光路关系 | 建立了光轴指向的实验室测量基准  | /                           |
| 扫描镜坐标系   | /        | /                     | 建立了扫描镜指向的实验室测量基准 | /                           |
| 棱镜基准坐标系  | /        | /                     | /                | 通过棱镜建立了机械结构坐标与内部光路坐标系间的转换关系 |
| 机械坐标系    | /        | /                     | /                | /                           |

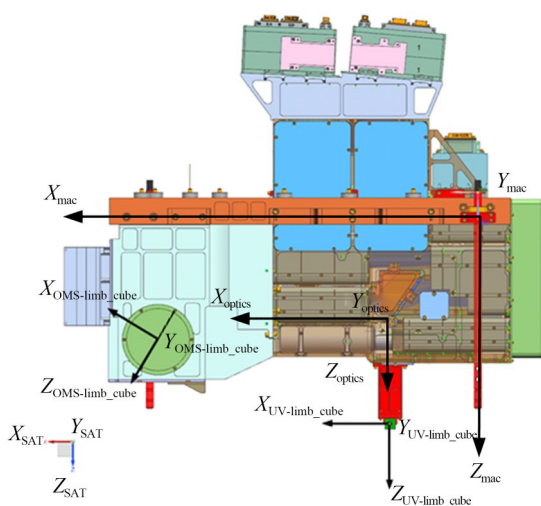


图2 OMS-L仪器内部坐标系

Fig. 2 OMS-L instrument coordinate system

在得到棱镜坐标系下的入射视向量 $\boldsymbol{u}_{\text{out,cube}}$ 和法线 $\boldsymbol{n}_{\text{cube}}$ 后,利用反射公式即可求得出射视向量 $\boldsymbol{u}'_{\text{out,cube}}$ :

$$\boldsymbol{u}'_{\text{out,cube}}=(\boldsymbol{u}_{\text{out,cube}})-2\boldsymbol{n}_{\text{cube}}(\boldsymbol{u}_{\text{out,cube}}\cdot\boldsymbol{n}_{\text{cube}}). \quad (3)$$

## 2.2 切点定位与切高解算

地球标准椭球几何模型可以写为如式(4)所示,其中 $a, b$ 分别椭球长短半轴。刘志文按照等扁率规则建立虚拟椭球模型求解了天宫二号紫外前向光谱仪大气临边高度<sup>[8]</sup>,其虚拟椭球长短半轴 $a', b'$ 的定义如式(5)所示,其中 $f$ 为地球扁率, $\Delta a$ 为层高。这种模型保证了以标准地球椭球模型为基准等扁率向外拓展,但是如图3所示虚拟椭球每层的层高 $h$ 在不同位置并不相等,这不利于临边探测数据的大气层析反演。因此本文采用更加侧重大气分层的等距离模型,定义 $a', b'$ 如式(6)所示:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{b^2}=1, \quad (4)$$

$$a'=a+\Delta a, b'=(1-f)a', \quad (5)$$

$$a'=a+\Delta a, b'=(1-f)a+\Delta a. \quad (6)$$

设已知仪器出射单位视向量 $\boldsymbol{u}$ ,卫星矢量 $\boldsymbol{s}$ ,未知尺度因子为 $k$ ,令 $\boldsymbol{u}'=\begin{bmatrix} \frac{u_x}{a'} & \frac{u_y}{a'} & \frac{u_z}{b'} \end{bmatrix}$ , $\boldsymbol{s}'=$

$\begin{bmatrix} \frac{s_x}{a'} & \frac{s_y}{a'} & \frac{s_z}{b'} \end{bmatrix}$ , 设则由图 3 可知归一化的  $P$  点坐标可以表达为:

$$p' = s' + ku'. \tag{7}$$

根据前文的定义,切点  $P$  显然在虚拟椭球方程上,将式(6)与式(7)代入椭球方程(4)可以得到一个关于尺度因子  $k$  和  $\Delta a$  的方程:

$$u'^2 k^2 + 2(u' \cdot s')k + s'^2 - 1 = 0. \tag{8}$$

由于出射视向量与虚拟椭球体相切,即  $u'$  与虚拟椭球体表面只有一个交点,故该方程根的判别式  $\Delta = 0$ ,即:

$$(u' \cdot s')^2 - u'^2 (s'^2 - 1) = 0. \tag{9}$$

整理上式求解虚拟椭球到标准椭球间的层高即切高  $\Delta a$ 。上式是一个形如  $Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E = 0$  的四次方程,可采用科学计算软件求解或数值方法求数解。在得到  $\Delta a$  后再将其代入方程(8)求解尺度因子  $k$ ,最后利用式(7)可以计算切点  $P$  的三维坐标。

3 切点高度影响因素分析

如前文所述,OMS-L 设计的 15~60 km 切高

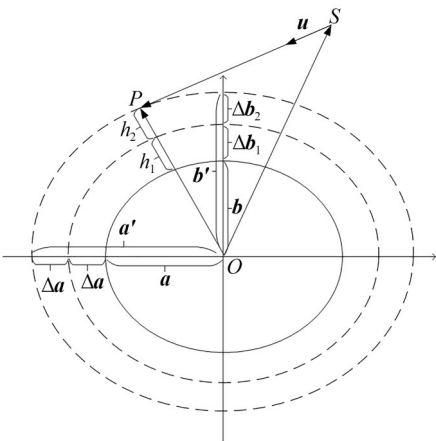


图 3 虚拟椭球切高模型  
Fig. 3 Virtual ellipsoid height model

观测范围是基于理想姿轨和简化地球圆球模型得出的,仪器实际在轨观测范围会受到地球模型、卫星轨道、卫星姿态、安装误差等因素的影响。表 2 给出了上述影响要素的指标和对切高的理论影响量级,可以看出卫星轨道和地球模型的影响最大。为此,本文设计了 8 种不同切高解算模型分别分析地球模型、卫星轨道、卫星姿态、安装误差对切高的影响,模型参数如表 3 所示。

表 2 切高影响因素  
Tab. 2 Influencing factors of tangent height

|          | 地球模型                               | 卫星轨道                    | 卫星姿态         | 安装误差  |
|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------|
| 影响参数     | 长短半轴                               | 卫星高度偏心率                 | 俯仰角          | 俯仰角   |
| 指标       | WGS84:长半轴 6 378 km<br>短半轴 6 356 km | 半长轴偏差≤5 km<br>偏心率≤0.003 | 三轴指向精度 0.15° | 0.15° |
| 对实际切高的影响 | 22 km                              | (43±5)km                | 9 km         | 9 km  |

表 3 8 种切高解算模型  
Tab. 3 Eight types of tangent height model

| 模型<br>序号 | 地球模型     | 卫星轨道   | 卫星姿态  | 安装偏差 |
|----------|----------|--------|-------|------|
| 1        | 理想圆球     | 理想轨道高度 | 理想零姿态 | 理论安装 |
| 2        | 理想圆球     | 理想轨道高度 | 实际姿态  | 理论安装 |
| 3        | 理想圆球     | 实际轨道   | 理想零姿态 | 理论安装 |
| 4        | 理想圆球     | 理想轨道高度 | 理想零姿态 | 实际安装 |
| 5        | 理想圆球     | 实际轨道   | 实际姿态  | 实际安装 |
| 6        | WGS84 椭球 | 理想轨道高度 | 理想零姿态 | 理论安装 |
| 7        | WGS84 椭球 | 理想轨道高度 | 理想零姿态 | 实际安装 |
| 8        | WGS84 椭球 | 实际轨道   | 实际姿态  | 实际安装 |

为了分析上述因素对 OMS-L 切高的实际影响,本文利用仪器在轨观测能力理论下限 0 km (实际可达 -10 km)切高设计了半轨固定扫描角的观测试验,根据式(1)可以算出 -10 km 对应扫描角  $\theta = 14.0134^\circ$ ,然后利用上述 8 种不同参数组合模型分别解算实际切高,解算结果如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。图中前 5 种结果均是基于理想圆球解算得到的,后三种是基于地球椭球模型得到的。从图中的黑线可以看出,基于地球圆球、理想轨道姿态及无安装偏差情况下,切高解算结果与 -10 km 完全吻合;通过近乎重叠的黑线和红线可以看出实际姿态对切高的影响量

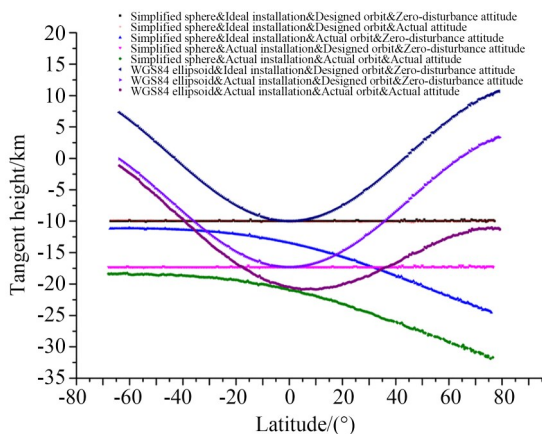


图 4 不同参数组合模型解算实际切高结果  
Fig. 4 Results of different tangent-height model

级小于 0.1 km,高于指标要求;通过蓝线和黑线对比可以看出卫星实际轨道比理论值偏低,轨道对切高的影响最大达到了 13 km;通过比较黑线和粉线可以看出仪器实际安装带来的指向偏差比设计偏低了 7.3 km,满足设计指标;比较黑线和绿线可以看出实际轨道姿态和安装偏差对理论切高的综合影响最大达到了 22 km。从图中的深蓝线可以看出,基于 WGS84 椭球、理想轨道姿态及无安装偏差情况下,切高解算结果随着南北纬度增大而对称增大,在 0°纬度处与圆球模型完全吻合,在南北纬 65°时变化达到了 17 km。通过比较褐线与黑线可以看出,上述所有因素对切高的综合影响达到了±10 km。

通过上述 8 种模型的分析可以看出,如果只按照理论切高高度范围设计 OMS-L 扫描镜观测指向角度范围,实际在轨切高观测范围将会产生变化,实际观测高度不足以实时覆盖到 15~60 km 的廓线观测。基于上文的分析,如果调整 OMS-L 扫描镜观测角度的上下限,将探测高度从 15~60 km 共 15 层拓展到 0~100 km 共 34 层观测,即可以实现观测高度层的冗余覆盖。但考虑到 OMS-L 观测过高或过低切点处辐射信号的信噪比和灵敏度,经过在轨测试,目前 OMS-L 在轨实际观测为 4~28 层,表 5 给出了层号与切高的对应关系。

图 6 画出了 20250318 一轨 89 次观测每次 25 层的切高解算结果,可以看出 OMS-L 的切点纬度覆盖范围为±80°,切高的范围根据卫星位置不同而变化。整体来看,由于地球扁率影响,切

| TH/km | No. | TH/km | No. | TH/km | No. | TH/km | No. | TH/km | No. |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 0     | 1   | 21    | 8   | 42    | 15  | 63    | 22  | 84    | 29  |
| 3     | 2   | 24    | 9   | 45    | 16  | 66    | 23  | 87    | 30  |
| 6     | 3   | 27    | 10  | 48    | 17  | 69    | 24  | 90    | 31  |
| 9     | 4   | 30    | 11  | 51    | 18  | 72    | 25  | 93    | 32  |
| 12    | 5   | 33    | 12  | 54    | 19  | 75    | 26  | 96    | 33  |
| 15    | 6   | 36    | 13  | 57    | 20  | 78    | 27  | 99    | 34  |
| 18    | 7   | 39    | 14  | 60    | 21  | 81    | 28  | 102   |     |
| 21    |     | 42    |     | 63    |     | 84    |     |       |     |

图 5 层号与切高对应关系

Fig. 5 Correspondence between layer number and tangent height

高在地球赤道处较小在两极处较大。在两极切高呈现不对称特点,从上文分析可知这是卫星轨道扁率带来的影响。将 25 层逐层解算的切高求差可以得到层之间的相对切高如图 7 所示,统计相对切高均值为 3.01 km,标准差(STD)为 0.11 km,满足仪器设计指标要求。

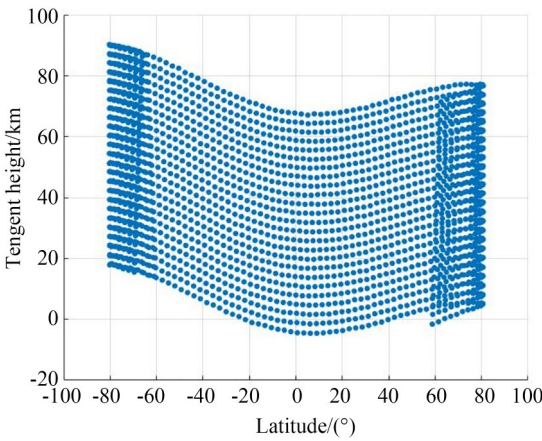


图 6 OMS-L 单轨切高解算结果  
Fig. 6 Result of single-track tangent height

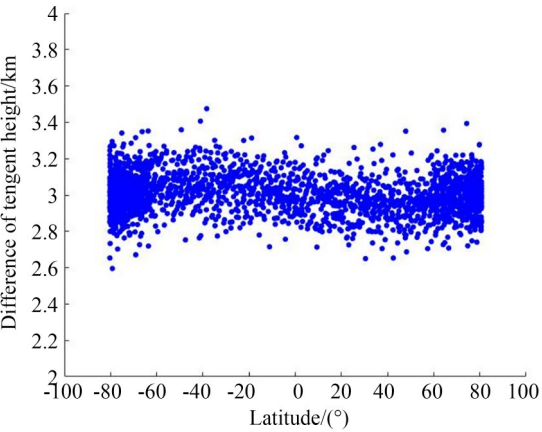


图 7 OMS-L 相对层高解算结果  
Fig. 7 Relative tangent height result

#### 4 基于knee点法的OMS-L切高检验订正

前文分析过程是基于可量化的理论影响参数,解算得到的切高结果只限于在轨无其他影响因素的工况下。但是卫星在轨还受到在地面无法无法真实模拟的热形变误差、控制误差、震动误差等,在轨绝对切高解算精度需要依靠外部参考基准来评估。Moy L指出300~310 nm波段的臭氧在40~60 km高度范围内的临边散射辐亮度(Limb Scattered Radiance, LSR)存在一个显著的极大值,即knee点。在knee点之上临边散射随高度降低而增强,在knee点处臭氧吸收导致的衰减与Rayleigh散射的增强达到平衡状态,而knee点之下临边散射辐亮度对高度的变化变得不再敏感<sup>[10]</sup>。因此本文基于上述原理,利用单层气候数据集或临边辐射传输模型模拟的LSR knee点与OMS-L切点处观测的LSR knee点相比较,即可以实现对OMS-L的切高偏差检验。

为了保持knee点高度在40 km以上以避免受到平流层气溶胶的干扰,同时减少对臭氧垂直分布变化的敏感度,本文选择305 nm作为检验波长。Song LIU等对用knee点法评估临边切高的精度做了敏感性分析,他指出该方法的检验精度在±300 m以内,算法不确定性对320 nm LSR模拟和臭氧廓线反演的影响分别在±4%和±8%以内<sup>[16]</sup>。同时值得注意的是,Gottwald M也指出该方法只有在热带地区(例如20°N至20°S之间),即在平流层和低中层臭氧变化较小的区域的检验结果是可靠的<sup>[11]</sup>。

本文首先对2024年7月18日多轨的OMS-L切高分别用ERA5数据集和SCIATRAN气候态数据两种模型进行评估。ERA5数据是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)研发的第五代全球再分析数据,具有高精度、时空连续性的大气、陆地及海洋变量数据集。本研究选取ERA5压力层数据,重点提取其中的温度、臭氧、气压及位势高度廓线,该数据的时间分辨率为1小时,空间分辨率达 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。SCIATRAN集成了B2D气候态数据库,该数据库包含大气痕量气体的月度和区域平均分布,这些数据是在海拔范围1~95 km内按 $10^{\circ}$ 纬度区间划分。本研究通过时间和空间匹配对应B2D廓线文件。从图8的评估结果可以看出,利用气候统计数据(左图)所计算出的切高偏移值呈现出显著的纬度依赖性特征,这是因为当前使用的气候统计资料与实际大气状况之间存在的差异同样呈现出纬向依赖特性。相比而言,基于ERA5数据集(右图)计算出的切高偏移值纬度依赖现象则不明显,更符合实际。从切高偏差结果来看,对中低纬度数据求取均值得到初始切高系统偏高约4 km,表明热形变、震动等在轨误差对仪器指向精度的影响达到了 $0.07^{\circ}$ 。本文通过调整俯仰方向的视向量指向,构造修正安装矩阵订正此系统偏差。为了验证订正效果,本文比较了切高订正前后LSR模拟值与观测值间的一致性,如图9所示订正前后的相关系数由0.875提升到了0.946,表明在轨订正有效。然后本文进一步分析切高在一年中不同时间的变化规律。选取2024年10月到2025年9月期间每个月一天的24小时数据切高结果进行统计分析如图10所示。可以看出

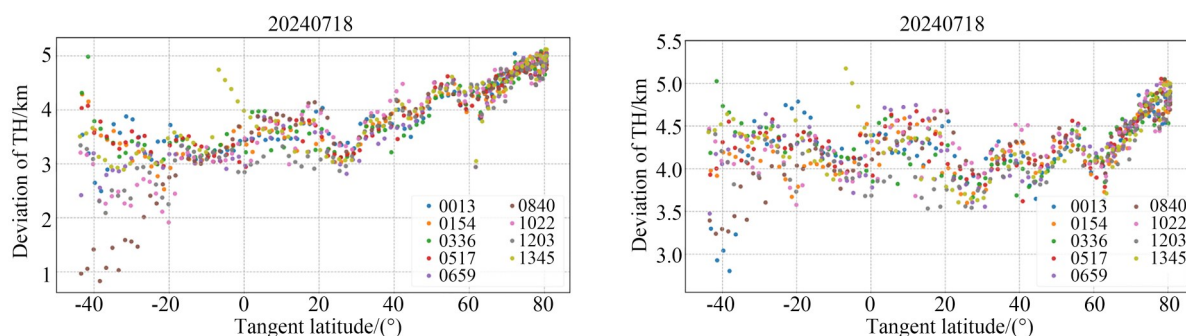


图8 气候数据集与ERA5模型统计结果

Fig. 8 Climate dataset and statistical results of the ERA5 model

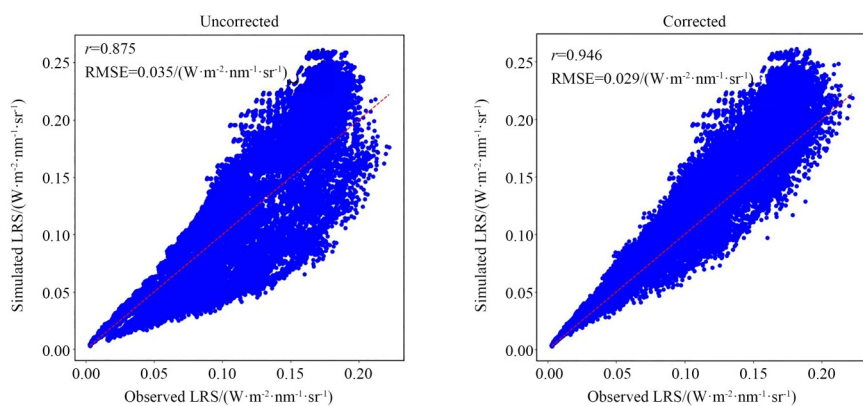


图9 切高订正对辐射仿真的影响

Fig. 9 Influence of tangent height correction on radiation simulation

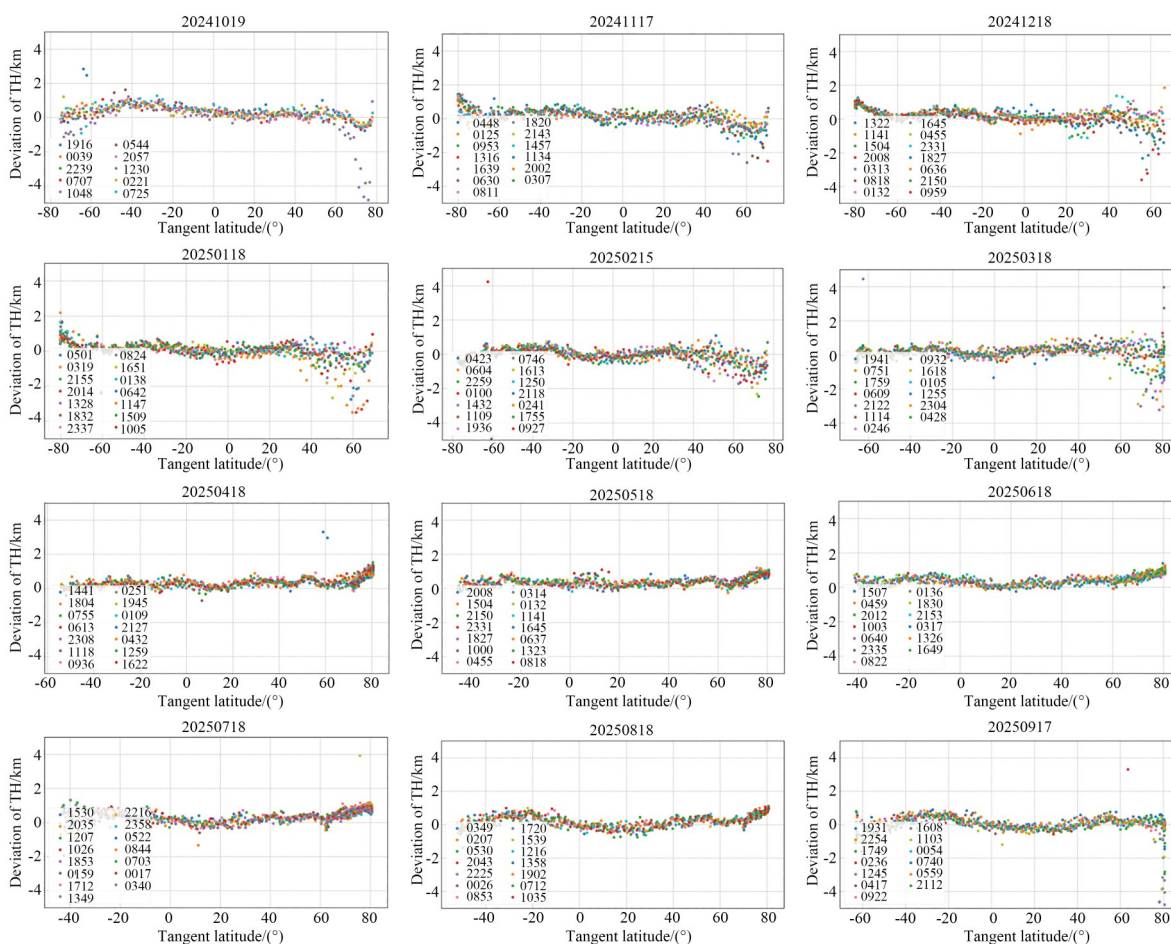


图10 基于ERA5模型逐月切高偏差统计结果

Fig. 10 Monthly tangent height bias of based on ERA5 mode

除了高纬部分,在中低纬平流层和低中层臭氧变化较小的区域切高偏差接近于0,统计12个月的南北纬 $30^{\circ}$ 内偏差均值和STD如表4所示。从表中STD结果可以看出knee点法的切高订

正精度优于 $0.4\text{ km}$ ,与前文理论结论吻合;从均值可以看出OMS-L切高季节性变化幅度为 $0.3\text{ km}$ ,换算为仪器垂向(沿轨)指向年际变化小于 $0.01^{\circ}$ 。

表 4 切高偏差月均值和标准差

Tab. 4 Average and STD of monthly tangent height deviation (km)

| Month | 10   | 11   | 12   | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   |
|-------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| MEAN  | 0.15 | 0.24 | 0.10 | 0   | 0   | 0.17 | 0.22 | 0.32 | 0.31 | 0.18 | 0.10 | 0   |
| STD   | 0.3  | 0.2  | 0.3  | 0.2 | 0.2 | 0.3  | 0.2  | 0.3  | 0.3  | 0.3  | 0.4  | 0.3 |

5 基于同平台仪器互相关匹配评估指向精度

利用上述 knee 法能够实现沿轨方向的切高指向系统性偏差订正,但是无法实现跨轨方向的指向准确性评估,因此二维综合指向评估仍然需要依靠地面特征参照或同平台图像匹配的方法。基于 OMS-L 0 km 的对地成像模式,由于其入射角接近 90°,沿轨瞬时视场地面距离达到了 37.9 km,采用 1.2 s 积分时间后单帧像元对应地面距离为 39.4 km,沿轨分辨率放大效应显著。但是对于跨轨方向,OMS-L 幅宽约为 100 km,200 个像元视场角为 1.82°,在切点处单像元对应地面距离约为 0.5 km。考虑空间维像差弥散斑接近 10 pixels,可辨识像元跨轨等效分辨率为 5 km,具有一定精度的地物信息识别能力。因此利用 FY-3F 同平台同波段的紫外-天底(OMS-N)探测仪大面阵图像与临边 0 km 观测图像进行特征匹配可以获得跨轨方向偏差。

如图 11 所示,底图为 FY-3F OMS-N 可见波段图像,其视场设计为 112°,星下点像元分辨率为 7 km×7 km(沿轨×跨轨)<sup>[17]</sup>。图 11 叠加经过实验室绝对光谱辐射定标订正<sup>[18]</sup>后的 OMS-L 0 km 观测辐亮度图像,跨轨幅宽为 100 km。从图中可以看出经过辐射值归一化变换后的两者地物和云层信息明显具有一致性。需要指出的是,如上文所述由于存在轨道偏心率和地球扁率的影响,图中实际观测切高可低至-20 km。本文

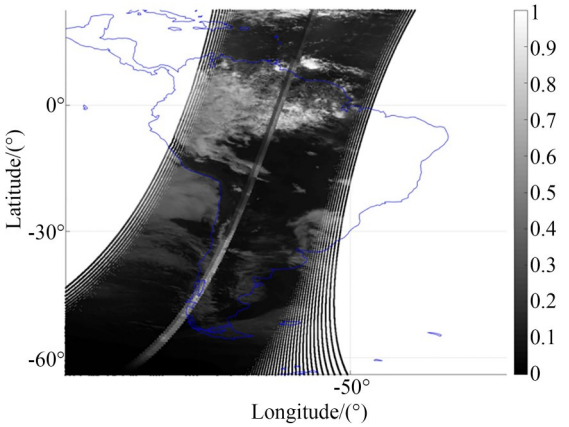


图 11 OMS-L 与 OMS-N 灰度图像叠加图

Fig. 11 Grayscale overlay image of OMS-L and OMS-N

首先针对 OMS-N 可见光图像选取海陆边界清晰的区域进行 FMASK 云检测筛选,在此基础上利用哨兵 3 号基准数据进行分块 SIFT 算法匹配<sup>[19-20]</sup>:将图像按 512×512 pixels 大小分块,块间重叠 10% 以避免边缘特征丢失,设置对比度阈值 0.005 以保留低对比度区域的特征点,设置高斯模糊标准差 0.5 以降低模糊程度以捕捉更精细的局部细节。另外,针对误匹配识别,本文使用双向最近邻匹配与 KNN 筛选,当匹配点对的几何投影误差超过 0.8 pixels 时用 RANSAC 剔除误匹配点,上述处理步骤如图 12 所示。基于上述方法得到 OMS-N 全像面定位偏差检验矢量图如图 13 所示,图中的横纵坐标为像元编号。可以看出地中海区域地物信息信噪比较高,整体偏差优于 1

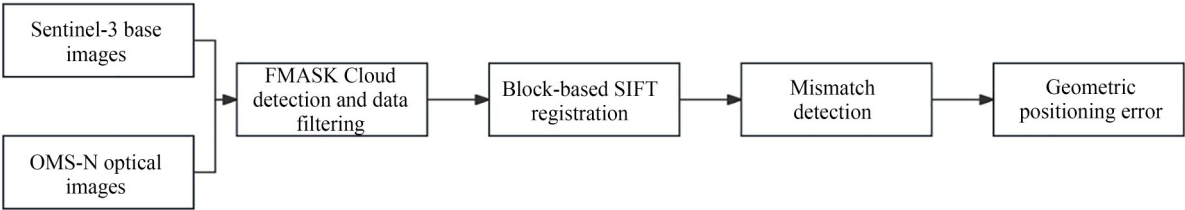


图 12 OMS-N 定位精度检验流程

Fig. 12 Process of geolocation accuracy assessment for OMS-N

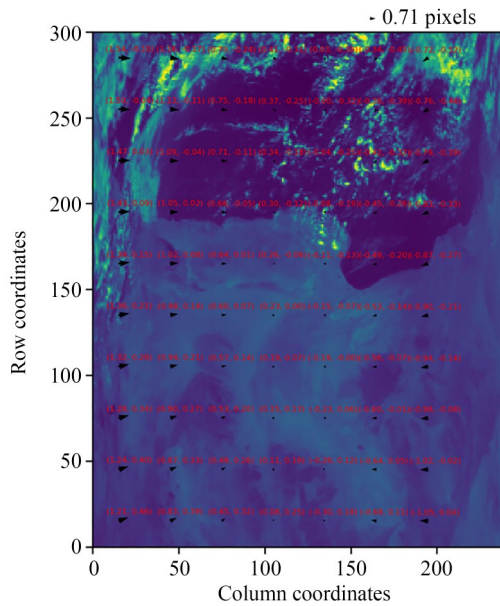


图 13 OMS-N 地中海区域定位精度检验矢量图

Fig. 13 Geolocation accuracy evaluation vector of OMS-N in mediterranean region

pixel。匹配与 OMS-L 相同观测时段的 OMS-N L1 级数据, OMS-N 星下点附近 30 pixels 的定位偏差统计散点图如图 14 所示, 统计其星下点 100 km 幅宽范围内定位偏差均值为 0.3 pixels, 按照交轨分辨率转换为距离偏差为 2.1 km。然后采用均方误差匹配方法对 OMS-L 进行图像匹配, 得到的偏差统计误差棒图如图 15 所示。可以看出 6 个时次的 OMS-L 沿轨偏差均在 1 pixel 以内, 跨轨偏差匹配精度为  $(2.0 \pm 4.7)$  pixels。按照 OMS-L 跨轨分辨率换算等效距离为 3.4 km。同时考虑 OMS-N 的定位偏差和同平台图像匹配偏差, 可以推算 OMS-L 切点定位偏差约为 5.5 km, 等效仪器指向  $0.1^\circ$ 。

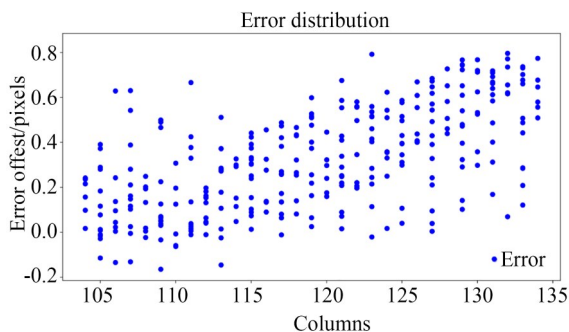


图 14 OMS-N 定位偏差精度检验统计

Fig. 14 Geolocation accuracy statistics of OMS-N

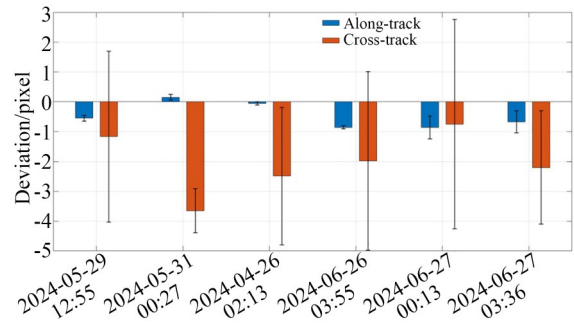


图 15 OMS-L 定位偏差互匹配精度检验结果

Fig. 15 Geolocation deviation inter-matching accuracy of OMS-L

## 6 结 论

本文针对 FY-3F 紫外高光谱臭氧探测仪基于仪器精测坐标系推导了扫描镜视向量的观测几何指向模型, 采用了更符合大气层析观测的等距离虚拟椭球构建了切高解算模型。首次研发 8 种配置参数模式在轨分析地球椭球/圆球模型、FY-3F 轨道姿态、安装参数以及综合因素对理论设计观测切高的影响, 其分别达到了 17 km, 13 km, 7 km 和 10 km。基于本文的分析通过在轨调整 OMS-L 扫描镜指向, 将临边观测设计的 15~60 km 观测绝对切高范围扩展到 0~100 km, 实现了考虑在轨工况条件下的观测范围冗余观测。针对 OMS-L 在轨初期观测解算的切高, 采用 knee 点法评估发现仪器在垂直方向上存在约 4 km 的系统偏差, 表明热形变、震动等在轨误差对仪器指向精度的影响达到了  $0.07^\circ$ 。通过在轨修正仪器安装参数并通过切高统计一年的仪器指向稳定性, 结果表明切高订正精度优于 0.4 km, 仪器垂向(沿轨)指向年际变化小于  $0.01^\circ$ 。最后针对临边极限观测视角下的低分辨率图像无法有效识别地标问题, 利用同平台同波段的对地探测载荷 OMS-N 图像作为基准, 与临边 0 km 观测图像进行匹配实现跨轨指向精度评估。图像匹配结果显示, 跨轨方向定位偏差对应仪器指向偏差为  $0.1^\circ$ 。以上结果表明 OMS-L 沿轨跨轨在轨指向精度可以满足后续产品反演需求。

### 作者贡献声明:

王嘉琛:方法的提出,数据处理,论文撰写;

商建:技术方案把关,论文审核;

杨磊:提供地理定位基本原理思路;  
王静:提供临边定位解算思路;  
刘崧:通过knee点法对切高偏差进行评估;  
李清扬:提供基准图像紫外-天底定位检验结果;

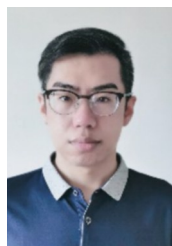
李元:通过辐射定标对定位数据进行评估;  
林冠宇:仪器总体设计把关;  
李占峰:提供实验室仪器指向标定参数;  
徐娜:论文把关审核;  
江若楠:辐射仿真数据处理。

## 参考文献:

- [1] VON SAVIGNY C, KAISER J W, BOVENS-MANN H, *et al.* Spatial and temporal characterization of SCIAMACHY limb pointing errors during the first three years of the mission[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(10): 2593-2602.
- [2] 朱芳, 李素文, 杨太平, 等. 基于OMPS临边散射观测的臭氧廓线反演及应用研究[J]. *光学学报*, 2025, 45(6): 0601006.  
ZHU F, LI S W, YANG T P, *et al.* Retrieval of ozone profiles and application from OMPS limb scattering observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(6): 0601006. (in Chinese)
- [3] LOUGHMAN R P, GRIFFIOEN E, OIKARINEN L, *et al.* Comparison of radiative transfer models for limb-viewing scattered sunlight measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D6): 2003JD003854.
- [4] 刘崧. 利用天宫二号临边载荷反演平流层臭氧和气溶胶消光廓线的方法研究[D]. 中国科学院大学, 2023.  
LIU S. *Inversion of Stratospheric Ozone and Aerosol Extinction Profiles Using Limb Detection Instrument on Tiangong-2* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [5] GOTTWALD M, KRIEG E, LICHTENBERG G, *et al.* Nine years of atmospheric remote sensing with SCIAMACHY-instrument performance [C]. 2011 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 24-29, 2011. Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2011: 3538-3541.
- [6] 王雅鹏, 张兴赢, 闫欢欢, 等. 大气成分临边散射探测技术进展[J]. *遥感学报*, 2024, 28(8): 1870-1884.  
WANG Y P, ZHANG X Y, YAN H H, *et al.* Development and application of satellite-based limb scattering for atmospheric compositions[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(8): 1870-1884. (in Chinese)
- [7] 吴伟平, 马庆军, 王淑荣. 大气临边观测中视轴临边指向精度的在轨补偿[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 569-576.  
WU W P, MA Q J, WANG S R. On-orbit correction method for limb pointing error of ozone detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 569-576. (in Chinese)
- [8] 刘志文, 李盛阳. 天宫二号紫外前向光谱仪大气临边高度计算[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1517-1523.  
LIU Z W, LI S Y. High precision limb height calculation of ultraviolet forward spectrometer of Tian-Gong-2 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1517-1523. (in Chinese)
- [9] 王晓恒. 天底与全方位临边大气成像探测仪研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
WANG X H. *Research on Sky-Bottom and Omni-Directional Edge Atmospheric Imaging Detector* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [10] MOY L, BHARTIA P K, JAROSS G, *et al.* Altitude registration of limb-scattered radiation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(1): 167-178.
- [11] GOTTWALD M, KRIEG E, SLIJKHUIS S, *et al.* The Status of the SCIAMACHY Line-of Sight Pointing Knowledge[C]. *ESA Living Planet Symposium*, 28 June - 2 July 2010, SP-686, Bergen, Norway, 2010.
- [12] KAISER J W, VON SAVIGNY C, EICHMANN K U, *et al.* Satellite-pointing retrieval from atmospheric limb-scattering of solar UV-B radiation[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2004, 82(12): 1041-1052.
- [13] 朱芳, 司福祺, 周海金, 等. SCIAMACHY临边散射探测的切高校正及敏感性研究[J]. *遥感学报*, 2023, 27(10): 2418-2430.  
ZHU F, SI F Q, ZHOU H J, *et al.* Tangent height correction and sensitivity studies from SCIA-

- MACHY limb scattering detection [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023, 27(10): 2418-2430. (in Chinese)
- [14] LI Z F, ZHAO F C, LI Y, *et al.* Ozone Monitoring Spectrometer-Limb observation (OMSL) on-orbit polarization correction for atmospheric radiation measurements [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114820.
- [15] 陈宝刚, 夏豪杰, 张进, 等. 大型望远镜指向精度的影响因素及综合修正模型研究 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(20): 3017-3025.
- CHEN B G, XIA H J, ZHANG J, *et al.* Research on factors influencing the pointing accuracy of large telescopes and the correction model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(20): 3017-3025. (in Chinese)
- [16] LIU S, LI Y, XU N, *et al.* Validation and Correction of In-Orbit Tangent Height for the Ozone Monitoring Suite-limb onboard FY-3F [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2025, 40(0): 1-9.
- [17] WANG Q, WANG Y M, XU N, *et al.* Preflight spectral calibration of the ozone monitoring suite-nadir on FengYun 3F satellite [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(9): 1538.
- [18] 陈健, 王伟国, 高慧斌, 等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递 [J]. *中国光学*, 2012(4): 423-429.
- CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al.* Radiation calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics*, 2012(4): 423-429. (in Chinese)
- [19] AHMED W F, ABD-ALMAJIED M I. Image matching for multi spectral image satellite SIFT and features [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2857(1): 012038.
- [20] LIANG K W, YANG G, ZUO Y Y, *et al.* A novel method for cloud and cloud shadow detection based on the maximum and minimum values of sentinel-2 time series images [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(8): 1392.

## 作者简介:



王嘉琛(1992—),男,天津人,博士,高级工程师,2020年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国气象局国家卫星气象中心高级工程师,主要从事遥感数据地理定位算法研究。E-mail: wangjiachen@cma.gov.cn

## 通讯作者:



商建(1983—),女,山东济宁人,博士,正高级工程师,2004年于山东大学获得学士学位,2009年于中国科学院电子学研究所获得博士学位,主要从事遥感卫星辐射定标与几何定位研究。E-mail: shangjian@cma.gov.cn